

肥胖儿童的运动干预

周誉¹, 王海俊²

1. 中国教育科学研究院体育美育教育研究所, 北京 100088; 2. 北京大学公共卫生学院妇幼卫生系, 北京大学医学部-潍坊市妇幼健康联合研究中心

摘要: 身体活动不足和静坐少动行为是导致儿童超重肥胖的重要因素, 运动对肥胖儿童的身体形态、身体素质和心理方面均有诸多益处, 是肥胖儿童综合干预中的重要组成部分。运动发挥作用的机制包括减少脂肪组织、调节细胞因子和激素水平、改善胰岛素抵抗和炎症状态、促进大脑发育等多个方面。目前尚未明确运动作用于肥胖儿童的具体量效关系, 但有氧运动或有氧运动结合抗阻运动是更加合理的选择, 高强度间歇训练在肥胖儿童中的应用逐渐增多。未来有必要研发兼具有效性、省时性和安全性的最佳运动形式, 探索适用于肥胖成年人的新方法是否适用于儿童青少年。

关键词: 肥胖; 运动; 干预; 儿童

中图分类号: R723.14 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2025)02-0127-05 doi:10.11852/zgetbjzz2024-1457

Exercise intervention for obese children and adolescents

ZHOU Yu¹, WANG Haijun²

1. Institute of Physical and Aesthetic Education, China National Academy of Educational Sciences, Beijing 100088, China;

2. Department of Maternal and Child Health, School of Public Health, Peking University

Corresponding author: WANG Haijun, E-mail: whjun@pku.edu.cn

Abstract: Insufficient physical activity and sedentary behavior are significant factors contributing to childhood overweight and obesity. Exercise offers numerous benefits to obese children in terms of their physical appearance, physical fitness, and mental well-being, making it a crucial component of comprehensive interventions for obese children. The mechanisms by which exercise exerts its effects include reducing adipose tissue, regulating cytokine and hormone levels, improving insulin resistance and inflammatory states, and promoting brain development. Although the specific dose-response relationship of exercise in obese children has not been clearly established, aerobic exercise or a combination of aerobic and resistance exercise is considered a more reasonable choice, and the application of high-intensity interval training in obese children is gradually increasing. In the future, there is a need to develop optimal forms of exercise that are effective, time-efficient and safe, and to explore whether new methods suitable for obese adults can be adapted for use in children and adolescents.

Keywords: obesity; exercise; intervention; children

儿童肥胖是 21 世纪最重要的全球性问题之一。肥胖儿童比正常体重儿童更容易发生睡眠障碍、激素分泌紊乱、抑郁、骨骼肌肉疾病等合并症, 且成年后肥胖、过早死亡的风险更高。2019 年, 我国 6 岁以下儿童和 6~17 岁儿童青少年的超重肥胖患病率分别为 10.4% 和 19.0%^[1]。中国家庭追踪调查数据显示, 2014—2020 年间, 我国城市儿童的超重肥胖率从 21.6% 上升至 26.4%^[2]。2024 年, 非传染性疾病危险因素协作组织(NCD-RisC)的研究显示, 从 1990—2022 年, 在世界范围内中国男性学龄儿童青少年营养不良和肥胖双重疾病负担增长幅度最大, 增长 60.5%^[3]。

儿童肥胖的遗传因素、人口学因素不可干预, 通常认为可干预的危险因素包括膳食不合理、身体活动不足和静坐行为较多, 自然环境和社会文化因素如学校政策、家庭特征等也会影响儿童的饮食和身体活动, 进而导致儿童肥胖^[4]。提高身体活动水平不仅可增加能量消耗, 有助于控制体重, 还具有诸多健康益处, 如提高骨密度、调节血压、改善代谢健康、提高注意力和认知能力、促进心理健康等, 因此普遍将运动作为肥胖儿童综合干预中的重要组成部分。国内外学者关于运动对肥胖儿童的益处、作用机制以及运动形式和量效关系开展了广泛研究。

基金项目: 中国教育科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助(GYD2024012)

作者简介: 周誉(1990—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为儿童青少年体质健康与运动促进。

通信作者: 王海俊, E-mail: whjun@pku.edu.cn

1 运动对肥胖儿童的身体健康益处

运动对肥胖儿童的体成分、心肺功能、身体素质和身体姿态方面都具有益处。诸多研究已证实,运动能显著降低体重、体质量指数(body mass index, BMI)、腰围、体脂百分比、舒张压和收缩压,增加瘦体重和最大摄氧量。在肥胖的各项指标中,体脂百分比与肥胖儿童日常活动能力(以心肺耐力、6 分钟步行实验作为评价指标)的关系最为密切^[5],因此通过运动降低体脂百分比能有效提高肥胖儿童的活动能力。另外,肥胖会改变身体平衡,进而影响儿童的本体感觉,所以肥胖儿童通常存在身体姿态的问题。针对性的运动干预对肥胖儿童尤为重要,不仅能增加能量消耗达到减重的目的,还能提高功能能力、身体控制能力^[6],改善身体的不良姿态^[6]和步态^[7]。

在运动对肥胖儿童青少年内分泌代谢的益处方面,研究显示有氧运动、有氧结合抗阻运动能显著降低超重肥胖儿童青少年的空腹血糖、空腹胰岛素、胰岛素抵抗指数^[8],有氧运动能显著降低总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、甘油三酯^[9]、超敏 C 反应蛋白、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、瘦素水平^[10],提高高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)^[9]、白细胞介素-6(IL-6)、脂联素水平^[11],还能有效减少肝脏脂肪,有利于预防肥胖青少年非酒精性脂肪肝的发生发展^[12]。

在骨骼健康方面,肥胖儿童的肌肉力量特别是等长肌力较强与骨骼健康指标(如皮质骨面积、骨量、骨折载荷)相关^[13]。由于长期负荷过大与促炎细胞因子、瘦素和脂肪因子等影响,肥胖儿童下肢骨折、腰背疼痛等骨骼肌肉疾病发生率更高,所以对超重肥胖儿童进行抗阻练习以提高肌肉力量非常重要。

2 运动对肥胖儿童的心理健康益处

在心理健康方面,运动有利于青少年改善情绪状态,提高自我认知和自我效能^[14],改善抑郁症状^[15],提高主观幸福感,促进积极心理品质的发展。但运动对超重肥胖儿童青少年心理的具体影响尚无定论。由于研究设计和受试者的异质性,各项研究结果不一致。有研究发现为期 5 个月的足球运动能提高超重男生的自尊心^[16];为期 5 个月以有氧运动为主的趣味性活动能改善肥胖儿童的情绪健康、自我感知^[17];为期 8 个月课后趣味性有氧运动能改善超重儿童的抑郁症状和自我价值感^[18]。然而, Migueles 等^[19]对超重肥胖儿童进行为期 20 周、3~

5 次/周、90min/次有氧和抗阻相结合的运动干预后,受试者的心理健康状况并未显著改善。不同研究结果存在差异的原因包括运动干预的持续时间、频率、运动方式不同,研究对象的性别、年龄、肥胖程度、心理健康状况不同等。因此,运动对超重肥胖儿童青少年心理健康的作用有待未来进一步细化研究,包括何种运动形式如游戏类、操舞类、球类运动、是否结合抗阻训练,何种运动频率和持续时间能更有效地改善儿童青少年的心理健康。

3 运动改善肥胖儿童健康的作用机制

过多的脂肪组织与胰岛素抵抗、免疫细胞浸润、脂肪因子释放增加和全身炎症状态有关。运动除了直接减少脂肪组织、特别是内脏脂肪来改善胰岛素抵抗和炎症状态外,还可通过调节机体的细胞因子和激素水平、改善细胞功能来促进健康。运动特别是有氧运动可减少氧化应激和炎症性脂肪因子,激活并增加葡萄糖转运蛋白 4(GLUT-4)表达水平^[20-21]。运动与胰岛 β 细胞功能改善、胰岛素受体底物 1(IRS1)磷酸化的调节、血浆神经酰胺水平降低和诱导血管生成相关^[20],从而改善超重肥胖患者的胰岛素抵抗。

运动中骨骼肌收缩可产生并释放多种“肌肉因子”,除了作用于骨骼肌本身,还可作用于肝脏、胰腺、脂肪组织和心血管系统等。现有研究证据表明肌肉因子可能介导运动带来的多种健康效益,其中研究较多的是 IL-6。运动刺激骨骼肌释放 IL-6 是血液中其他炎症介质发生良性改变的重要原因,可能通过抑制促炎性细胞因子如 TNF- α 和白细胞介素-1 β (IL-1 β)的释放来引发抗炎级联反应^[22],促进白细胞介素-10(IL-10)、皮质醇和肾上腺素的释放,进而抑制多种促炎介质如 IL-1 α 、IL-1 β 、TNF- α 、趋化因子 IL-8 和巨噬细胞炎性蛋白 1- α (MIP-1 α)等^[22]。运动还可能使巨噬细胞从 M1 向 M2 表型转化^[23],诱导内源性大麻素系统的动员。运动中肌肉收缩会刺激骨骼肌释放 IL-6,释放的水平取决于运动中募集的肌肉量、运动强度和持续时间,同时与肌糖原呈负相关。因此,为了充分发挥运动的抗炎作用,运动需达到足够的强度(超过 70%最大有氧能力)和/或时间来消耗肌糖原^[24],从这一角度来看,抗阻运动结合有氧运动可能会提升运动的抗炎效果。

研究发现心肺耐力更好的儿童除了 IL-1 β 低于心肺耐力较差的儿童,两组儿童中 256 个基因表达存在差异,集中于与炎症相关的多巴胺能突触和 γ -

氨基丁酸 (GABA) 能突触, 如 *GNAO1*、*GNAL*、*GNG10*、*CREB3L3*、*PPP2R5E* 和 *GABARAP* 等。对照 PHENOPEDIA 数据库, 这些表达存在差异的基因与心血管疾病、代谢综合征、高血压、炎症和哮喘相关^[25]。多巴胺合成、释放和受体功能损伤可能是肥胖人群缺乏身体活动的潜在原因^[26], 而肥胖同时又可能会损害多巴胺能和 GABA 能系统^[27], 因此, 通过运动提升心肺耐力水平可能改善肥胖对多巴胺能和 GABA 能系统的不良影响。

研究还发现, 运动后体内鸢尾素水平上升^[28], 鸢尾素能诱导白色脂肪细胞转化为棕色脂肪细胞, 其表型与棕色脂肪细胞相似, 会增加产热和能量消耗。另外, 有限的研究显示, 运动中的肌肉收缩会促进 IL-15 的生成, 血液中 IL-15 的水平与躯干脂肪呈负相关^[29], 与体能水平呈正相关^[30], 但运动对超重肥胖儿童青少年 IL-15 的具体影响还有待进一步研究证实。

儿童心肺耐力与白质微观结构 (如胼胝体、放射冠、上纵束) 呈正相关, 青少年心肺耐力与皮质脊髓束的白质微观结构呈负相关^[31]。由于超重肥胖与儿童大脑白质发育有关, 因此学者探索了身体素质与白质微观结构的关系。有研究发现身体素质可能与海马亚区和额叶之间的功能连接有关, 良好的心肺耐力可增强海马体前部的功能连接^[32], 身体素质与白质微观结构之间的关联似乎更集中在特定的大脑区域。

4 针对肥胖儿童的运动干预方式和量效研究

Cochrane 系统综述显示, 对于 5~11 岁儿童, 单独提高身体活动水平或结合饮食调节均能降低儿童的 BMI, 而单独改变饮食摄入则未能降低儿童 BMI^[33]; 但对于 12~18 岁青少年, 提高身体活动水平的策略对于降低 BMI 的作用较弱^[34], 这可能与干预方案的运动方式、频率和时长存在差异有关。

不同运动方式效果有所区别, 其中有氧运动对降低体重和血压、提高心肺耐力的效果更好, 有氧结合抗阻运动对增加瘦体重、降低腰围、改善向心性肥胖的效果更好^[9]。从多数研究的结论来看, 有氧运动或有氧运动结合抗阻运动是更加合理的选择, 在有氧运动中, 快走、慢跑是研究最常用的运动方式, 强度一般在 40%~70% 储备心率 (heart rate reserve, HRR) 或 60%~90% 最大心率 (HRmax) 之间, 频率为 3~5 次/周, 干预时间至少持续 6 周以上。这也符合 WHO 建议儿童青少年每天应进行至少 60min 中等强度至较大强度身体活动 (MVPA),

并每周至少 3d 进行抗阻运动和骨骼强化运动的指南。但是, 目前对于肥胖儿童运动干预尚无明确的量效关系结论。关于肥胖儿童进行抗阻训练的研究相对较少, 难以比较运动效果并得到关于运动负荷的共识。

高强度间歇训练 (high-intensity interval training, HIIT) 与中等强度持续训练 (moderate-intensity continuous exercise, MICT) 相比, 可在生理、身体素质和健康相关结局方面产生与 MICT 类似甚至更好的效果, 同时显著缩短运动持续时间^[35]。已有学者开始探索 HIIT 对于超重肥胖儿童的适用性, 比较了较低强度间歇训练和较高强度间歇训练对超重儿童的影响, 发现后者能更为显著地改善身体成分、功能能力和有氧耐力^[36-37], 提高副交感神经张力和心脏自主调节能力^[38]。Racil 等^[39]研究发现, 12 周的 HIIT (15s 100% 最大有氧速度跑步结合 15s 50% 最大有氧速度跑步) 和 MIIT (15s 80% 最大有氧速度跑步结合 15s 50% 最大有氧速度跑步) 都能有效改善肥胖女生的心肺耐力和血压、胰岛素、瘦素等代谢指标, 但是 HIIT 能够有效改善身体成分和心脏收缩压乘积, 因此在同样的运动模式下具有更好的健康效益。HIIT 与 MICT 相比, 能更显著提升心肺耐力、减少内脏脂肪、改善身体成分^[40], 刺激机体产生更多的脂解激素^[41], 降低细胞间黏附分子-1 和血管粘附分子-1^[42]。还有研究显示, 虽然 HIIT 和 MICT 改善身体成分、心肺耐力和血压的作用相似, 但 HIIT 的持续时间比 MICT 少 70%^[43]。因此, HIIT 由于其有效性和省时性, 被认为是能纳入学校肥胖干预的有效方法。

有学者建议对于肥胖儿童青少年而言, 每周应进行 2~3 次 HIIT, 以 15~30s 的高强度运动结合 15~30s 的休息或积极性休息 (即低强度运动) 作为一个循环^[43]。但是, 目前同样没有关于 HIIT 持续时间较为一致的建议。每周 HIIT 的训练时间及干预时长与其健康效益之间均未呈现明显的量效关系, 4~15 周的 HIIT、每周训练时间在 6~44min 不等的 HIIT 均可有效提高肥胖儿童青少年的心肺耐力^[37]。因此, 在实践中可根据肥胖儿童青少年的具体情况和对 HIIT 的适应情况来制定训练方案。对于心肺耐力较差的儿童青少年可采用强度略小、重复次数和干预时间较长的 HIIT, 对于心肺耐力较好的儿童青少年可采用强度更大、重复次数和干预时间较短的 HIIT。但需要注意的是, 因为肥胖儿童下肢关节承受的负荷较大, 在进行 HIIT 时如何平衡下肢关节损伤风险和运动减重的关系, 需要进一步

研究。

5 肥胖成人运动干预新方法应用于儿童的研究

随着训练手段的丰富,一些新的运动方法逐渐应用于肥胖成年人中,例如全身振动训练、低氧运动、加压抗阻训练等,但这些方法是否适用于肥胖儿童青少年尚缺乏充分研究。有学者以 8 名肥胖青少年作为研究对象,发现单次全身振动训练后,受试者坐位体前屈幅度增大,登楼梯耐力试验的时间缩短,认为全身振动训练也有潜力成为一种适合肥胖青少年、无冲击的安全运动方式^[44]。在低氧运动的有限研究中,学者发现低氧环境下有氧运动结合抗阻练习能有效改善肥胖青少年的糖耐量和胰岛素反应^[45],即使是低强度的低氧运动也能显著改善肥胖状况,提高健康指标如最大摄氧量、最大有氧功率和肌肉力量^[46]。另外,“低住高训”(即在常氧环境生活和休息,在低氧环境运动)相比于普通运动干预,能更大程度地降低体重和 BMI,提高胰高血糖素样肽-1(GLP-1)水平和瘦体重^[47]。以上这些方法应用于儿童青少年的研究较少,无法得出确切的结论,需要对接受运动干预的肥胖儿童进行长期随访,以明确持续参与运动的情况以及健康状况的改善情况。

综上,关于肥胖儿童的运动干预还存在很多需要进一步研究明确的问题。在未来的研究中,应深入研究不同运动方式与肥胖儿童身体和心理健康的量效关系,研发兼具有效性、省时性和安全性的最佳运动方式,探索适用于肥胖成年人的新方法是否适用于儿童青少年。

参考文献

- [1] Pan XF, Wang L, Pan A. Epidemiology and determinants of obesity in China[J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2021, 9(6): 373-392.
- [2] 冷正清,阿力木江·依米提·塔尔肯. 中国 2014—2020 年 7~12 岁儿童生长趋势及超重肥胖状况分析[J]. *中国全科医学*, 2024, 27(1): 36-44,58.
- [3] NCD Risk Factor Collaboration. Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022: A pooled analysis of 3 663 population-representative studies with 222 million children, adolescents, and adults [J]. *Lancet*, 2024, 403(10431): 1027-1050.
- [4] Gurnani M, Birken C, Hamilton J. Childhood obesity: Causes, consequences, and management[J]. *Pediatr Clin North Am*, 2015, 62(4): 821-840.
- [5] Tsiros MD, Buckley JD, Olds T, et al. Impaired physical function associated with childhood obesity: How should we intervene? [J]. *Child Obes*, 2016, 12(2): 126-134.
- [6] Calcaterra V, Marin L, Vandoni M, et al. Childhood obesity and incorrect body posture: Impact on physical activity and the therapeutic role of exercise[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(24): 16728.
- [7] Molina-Garcia P, Molina-Molina A, Smeets A, et al. Effects of integrative neuromuscular training on the gait biomechanics of children with overweight and obesity[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2022, 32(7): 1119-1130.
- [8] Kazeminasab F, Sharafifard F, Miraghajani M, et al. The effects of exercise training on insulin resistance in children and adolescents with overweight or obesity: A systematic review and meta-analysis[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2023, 14: 1178376.
- [9] Kelley GA, Kelley KS, Pate RR. Exercise and adiposity in overweight and obese children and adolescents: A systematic review with network meta-analysis of randomised trials[J]. *BMJ Open*, 2019, 9(11): e031220.
- [10] Haapala EA, Väistö J, Ihalainen JK, et al. Associations of physical activity, sedentary time, and diet quality with biomarkers of inflammation in children[J]. *Eur J Sport Sci*, 2022, 22(6): 906-915.
- [11] García-Hermoso A, Ceballos-Ceballos RJ, Poblete-Aro CE, et al. Exercise, adipokines and pediatric obesity: A meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Int J Obes (Lond)*, 2017, 41(4): 475-482.
- [12] González-Ruiz K, Correa-Bautista JE, Izquierdo M, et al. Exercise dose on hepatic fat and cardiovascular health in adolescents with excess of adiposity[J]. *Pediatr Obes*, 2022, 17(4): e12869.
- [13] Comeras-Chueca C, Villalba-Heredia L, Lozano-Berges G, et al. High muscular fitness level may positively affect bone strength and body composition in children with overweight and obesity[J]. *Arch Osteoporos*, 2024, 19(1): 47.
- [14] Pascoe M, Bailey AP, Craike M, et al. Physical activity and exercise in youth mental health promotion: A scoping review [J]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 2020, 6(1): e000677.
- [15] Dale LP, Vanderloo L, Moore S, et al. Physical activity and depression, anxiety, and self-esteem in children and youth: An umbrella systematic review[J]. *Mental Health and Physical Activity*, 2019, 16: 66-79.
- [16] Seabra AC, Seabra AF, Brito J, et al. Effects of a 5-month football program on perceived psychological status and body composition of overweight boys [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24(Suppl 1): 10-16.
- [17] Romero-Pérez EM, González-Bernal JJ, Soto-Cámara R, et al. Influence of a physical exercise program in the anxiety and depression in children with obesity[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(13): 4655.
- [18] Williams CF, Bustamante EE, Waller JL, et al. Exercise effects on quality of life, mood, and self-worth in overweight children: The SMART randomized controlled trial [J]. *Transl Behav Med*, 2019, 9(3): 451-459.
- [19] Migueles JH, Cadenas-Sanchez C, Lubans DR, et al. Effects of an exercise program on cardiometabolic and mental health in children with overweight or obesity: A secondary analysis of a randomized clinical trial[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(7): e2324839.
- [20] Kojta I, Chacińska M, Blachnio-Zabielska A. Obesity, bioactive lipids, and adipose tissue inflammation in insulin re-

- sistance[J]. *Nutrients*, 2020, 12(5):1305.
- [21] Yariibeygi H, Atkin SL, Simental-Mendía LE, et al. Molecular mechanisms by which aerobic exercise induces insulin sensitivity [J]. *J Cell Physiol*, 2019, 234 (8): 12385-12392.
- [22] Metsios GS, Moe RH, Kitas GD. Exercise and inflammation [J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2020, 34 (2): 101504.
- [23] Han Y, Liu Y, Zhao Z, et al. Does Physical activity-based intervention improve systemic proinflammatory cytokine levels in overweight or obese children and adolescents? Insights from a Meta-analysis of randomized control trials[J]. *Obes Facts*, 2019, 12(6): 653-668.
- [24] Nimmo MA, Leggate M, Viana JL, et al. The effect of physical activity on mediators of inflammation[J]. *Diabetes Obes Metab*, 2013, 15(Suppl 3): 51-60.
- [25] Plaza-Florido A, Altmäe S, Esteban FJ, et al. Cardiorespiratory fitness in children with overweight/obesity: Insights into the molecular mechanisms [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2021, 31(11): 2083-2091.
- [26] Kravitz AV, O'neal TJ, Friend DM. Do dopaminergic impairments underlie physical inactivity in people with obesity? [J]. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 514.
- [27] Labban RSM, Alfawaz H, Almnaizel AT, et al. High-fat diet-induced obesity and impairment of brain neurotransmitter pool[J]. *Transl Neurosci*, 2020, 11(1): 147-160.
- [28] Pedersen BK, Febbraio MA. Muscles, exercise and obesity: Skeletal muscle as a secretory organ[J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2012, 8(8): 457-465.
- [29] Nielsen AR, Hojman P, Erikstrup C, et al. Association between interleukin-15 and obesity: Interleukin-15 as a potential regulator of fat mass[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2008, 93(11): 4486-4493.
- [30] Williams RA, Cooper SB, Dring KJ, et al. Physical fitness, physical activity and adiposity: Associations with risk factors for cardiometabolic disease and cognitive function across adolescence[J]. *BMC Pediatr*, 2022, 22(1): 75.
- [31] Rodriguez-Ayllon M, Esteban-Cornejo I, Verdejo-Román J, et al. Physical fitness and white matter microstructure in children with overweight or obesity: The active brains project[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 12469.
- [32] Esteban-Cornejo I, Stillman CM, Rodriguez-Ayllon M, et al. Physical fitness, hippocampal functional connectivity and academic performance in children with overweight/obesity: The active brains project[J]. *Brain Behav Immun*, 2021, 91: 284-295.
- [33] Spiga F, Davies AL, Tomlinson E, et al. Interventions to prevent obesity in children aged 5 to 11 years old[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2024, 5(5): Cd015328.
- [34] Spiga F, Tomlinson E, Davies AL, et al. Interventions to prevent obesity in children aged 12 to 18 years old[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2024, 5(5): Cd015330.
- [35] Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, et al. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans [J]. *J Physiol*, 2008, 586(1):151-160.
- [36] Lau PW, Wong DP, Ngo JK, et al. Effects of high-intensity intermittent running exercise in overweight children[J]. *Eur J Sport Sci*, 2015, 15(2):182-190.
- [37] Martin-Smith R, Cox A, Buchan DS, et al. High intensity interval training (HIIT) improves cardiorespiratory fitness (CRF) in healthy, overweight and obese adolescents: A systematic review and Meta-analysis of controlled studies [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(8):2955.
- [38] Farah BQ, Ritti-Dias RM, Balagopal PB, et al. Does exercise intensity affect blood pressure and heart rate in obese adolescents? A 6-month multidisciplinary randomized intervention study[J]. *Pediatr Obes*, 2014, 9(2): 111-120.
- [39] Racil G, Coquart JB, Elmontassar W, et al. Greater effects of high- compared with moderate-intensity interval training on cardio-metabolic variables, blood leptin concentration and ratings of perceived exertion in obese adolescent females [J]. *Bio Sport*, 2016, 33(2):145-152.
- [40] Meng C, Yucheng T, Shu L, et al. Effects of school-based high-intensity interval training on body composition, cardiorespiratory fitness and cardiometabolic markers in adolescent boys with obesity: A randomized controlled trial [J]. *BMC Pediatrics*, 2022, 22(1): 112.
- [41] Peake JM, Tan SJ, Markworth JF, et al. Metabolic and hormonal responses to isoenergetic high-intensity interval exercise and continuous moderate-intensity exercise [J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 2014, 307(7): E539-552.
- [42] Kargarfard M, Lam ET, Shariat A, et al. Effects of endurance and high intensity training on ICAM-1 and VCAM-1 levels and arterial pressure in obese and normal weight adolescents[J]. *Phys Sportsmed*, 2016, 44(3): 208-216.
- [43] Delgado-Floody P, Latorre-Román P, Jerez-Mayorga D, et al. Feasibility of incorporating high-intensity interval training into physical education programs to improve body composition and cardiorespiratory capacity of overweight and obese children: A systematic review[J]. *J Exerc Sci Fit*, 2019, 17(2): 35-40.
- [44] Sousa-Gonçalves CR, Tringali G, Tamini S, et al. Acute effects of whole-body vibration alone or in combination with maximal voluntary contractions on cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in obese male adolescents [J]. *Dose Response*, 2019, 17(4):1559325819890492.
- [45] de Groote E, Britto FA, Bullock L, et al. Hypoxic training improves normoxic glucose tolerance in adolescents with obesity[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2018, 50(11): 2200-2208.
- [46] Britto FA, De Groote E, Aranda J, et al. Effects of a 30-week combined training program in normoxia and in hypoxia on exercise performance and health-related parameters in obese adolescents: A pilot study[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2020, 60(4): 601-609.
- [47] Yang Q, Huang G, Tian Q, et al. "Living High-Training Low" improved weight loss and glucagon-like peptide-1 level in a 4-week weight loss program in adolescents with obesity: A pilot study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97 (8): e9943.